

## 惑星探査ローバーにおける Visual SLAM の利用に関する基礎検討

梶浦 梨央 木下 貴裕 小野 智司<sup>†</sup>  
鹿児島大学<sup>†</sup>

## 概要

近年、車輪型惑星探査機の自律化による探査効率の向上が求められており、カメラによる自己位置推定と地図生成技術 (Visual SLAM) の応用が期待されている。このため、本研究では、惑星探査機における Visual SLAM 手法の有効性を検討する。

## 1 はじめに

惑星探査ローバーは従来、通信遅延の生じる環境下であっても手動操作が主として用いられ、人間が画像から周辺環境を認識できない場合にのみ、車輪の回転から相対的に自己位置推定を行うホイールオドメトリや同様の手法で画像を用いる Visual Odometry (VO) 等を利用した自動運転が行われていた [1]。しかし、これらの手法は誤差が蓄積される問題があり、特に VO は画像特徴点の少ない環境に不向きである。今後の惑星探査の自動化を進める上での課題となっている。

このため、本研究では、特徴点の少ない環境下での周辺環境の理解と自己位置推定を同時に行う Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) に着目する。特に、探査機の軽量化や不測の事態への対処を考慮し、単眼カメラを利用する Visual SLAM の性能を評価する。実験により、地球上の住宅地では 99.6% の軌道を推定できる Visual SLAM であっても、惑星探査では軌道の再構成に成功した割合は全体の 16.0% となることを確認した。

## 2 関連研究

単眼カメラを用いた一般的な Visual SLAM の手法は特徴点ベースの手法 [2] と画像全体の輝度値差を用いる直接法 [3] の 2 種類に大別される。前者は特徴点を用いて再投影誤差を小さくしながら疎な



(a) Erfoud データセット (b) KITTI データセット

図 1 データセットの例

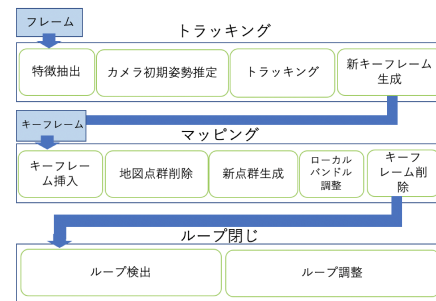


図 2 ORB-SLAM2 の処理手順

点群を復元するのに対し、後者は輝度を直接用いることで密な点群を復元する。これらの手法は室内や公園、道路などの屋外で撮影されたデータセットに対しては適用されているが、惑星探査機用のデータセットに対して実行された例は少ない [4]。

## 3 方法

本論文では、惑星探査ローバーが撮影したデータにおける特徴点ベースの Visual SLAM 手法の有効性を検討する。本研究は、FAST 特徴点検出器/記述子を使用し、少ない計算コストで並進、回転、スケール変化に対して頑健な ORB 特徴量を使用する ORB-SLAM2 を対象とする。ORB-SLAM2 の処理手順は、図 2 に示すように、カメラ姿勢の推定を行うトラッキング、点群の生成や更新を行うマッピング、および、蓄積誤差を削減するためのループ閉じの 3 つの計算過程から構成される。

惑星探査機における有効性を検証するため、惑星探査ロボットの評価・検証用に収集された Erfoud データセット [5] を使用する。本研究では、本データセットに含まれる軌道の中でも、緩やかな下り坂を開始地点とし、小さく乾いた川床を横切り、緩や

A Fundamental Study on Visual SLAM for Planetary Exploration Rovers

<sup>†</sup> Rio Kajiura, Takahiro Kinoshita, and Satoshi Ono, Kagoshima University

かに上昇して開始位置に戻る環状の軌道（軌道 01, 図 1(a)) を使用する. 軌道上を 0.5[m/s] の速度で移動するロボットに搭載されたステレオカメラの左カメラで 2Hz の周期で撮影された 1,940 フレーム分の画像データを使用する. また, RTK GPS で取得したデータを真値として使用する.

惑星探査データの比較対象として, 住宅地で取得された KITTI データセット [6] (順列 00, 4,541 フレーム, 図 1(b)) に対しても ORB-SLAM2 を実行する.

なお, 本実験は, PC (CPU: 3.4GHz, RAM: 32GB, OS: Ubuntu18.04) 上で ROS を動作させ, 公開されている ORB-SLAM2 の実装を利用する.

## 4 結果

Erfoud データセットと KITTI データセットそれぞれに対して ORB-SLAM2 を実行し, 自己位置推定に成功した軌跡距離の割合を調査した. 図 3 および図 4 に, Erfoud データセットと KITTI データセットに対して ORB-SLAM2 を実行した際の推定軌跡および生成した地図をそれぞれ示す. KITTI データセットでは, 真値の軌道 (3,724.2[m]) のうち, ORB-SLAM2 によって推定された軌道の長さは 3,708.1[m] であった. 一方, Erfoud データセットでは, 真値の軌道 (267.9[m]) のうち, 推定された軌道の長さは 43.0[m] であった. 推定を行えた軌道の長さの割合に着目すると, ORB-SLAM2 は, KITTI データセットでは 99.6% の推定に成功したが, Erfoud データセットでは 16.0% のみ推定可能であった. また, 図 3(a) に示すように, 推定に成功した部分に注目すると, 真値の軌道は蛇行しているが, 推定軌道は直線になっていることから相対的な変化を捉えられていないことがわかる.

Erfoud データセットで自己位置推定に失敗した要因を探るために, 特徴点の検出状況について確認したところ, 画像から特徴点が検出されていることを確認できた. また, 検出されたキーフレームの割合に着目したところ, KITTI データセットにおける検出割合 36.6% に対して, Erfoud データセットでは 13.4% と少ないもののある程度のキーフレームが検出されていることを確認した. これらのことから, Erfoud データセットでは, 特徴点間の特徴量が類似しているため, トラッキングおよびマッピングにおける対応点を探索する処理に問題が生じたと考える. 単調な地形において対応点の探索が困難であ

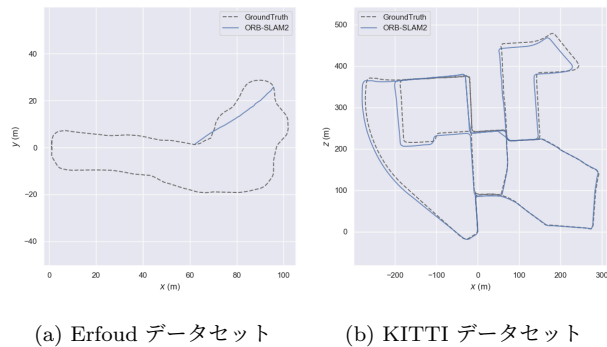


図 3 推定軌道

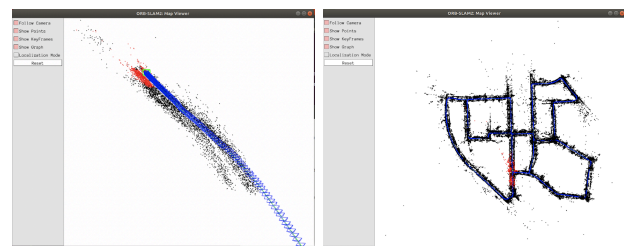


図 4 ORB-SLAM2 によって生成した地図

ることは, 先行研究 [1] で示されている知見と一致する.

## 5 結論

本論文では, Erfoud データセットに対して ORB-SLAM2 を実行することで, 惑星探査機における Visual SLAM の有効性を検証した. 実験の結果, 特徴点の特徴量が類似するために特徴点間の対応付けが困難であり, 自己位置推定に失敗している可能性が高いことを確認した. 今後, 直接法など他の Visual SLAM 手法の有効性を検証する.

## 参考文献

- [1] M. Maimone, et al.: Two years of visual odometry on the mars exploration rovers. *J. Field Robotics*, 24(3):169–186, 2007.
- [2] R. Mur-Artal, et al.: Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and rgb-d cameras. *IEEE Trans. Robotics*, 33(5):1255–1262, 2017.
- [3] J. Engel, et al.: Lsd-slam: Large-scale direct monocular slam. In *ECCV*, pp. 834–849, 2014.
- [4] A. Bajpai, et al.: Planetary monocular simultaneous localization and mapping. *J. Field Robotics*, Vol. 33, No. 2, pp. 229–242, 2016.
- [5] S. Lacroix, et al.: The erfoud dataset: a comprehensive multi-camera and lidar data collection for planetary exploration. In *Symp. ASTRA*, 2020.
- [6] A. Geiger, et al: Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In *CVPR*, 2012.